

任意形状旁瓣波束形成技术研究

幸高翔, 蔡志明

(海军工程大学电子工程学院电子工程系, 湖北武汉 430033)

摘要: 在自适应零陷形成的基础上, 提出了一种自适应加权算法, 用于任意阵型阵列构成具有任意形状旁瓣的波束图, 并考虑基元方向性对波束图的影响. 给出了实现自适应加权算法的三个步骤, 预先设定所需旁瓣形状及旁瓣级, 采用循环, 最终使旁瓣与预设形状吻合. 将该算法用于均匀线阵和抛物线阵, 均得到期望的结果, 并与道夫切比雪夫加权作了相应比较. 研究表明, 基元的方向性对该算法波束形成的影响很小, 新算法可以消除基元宽带方向性对波束的影响.

关键词: 波束形成; 任意形状旁瓣; 自适应加权; 基元方向性

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12:2152-04

Research on the Technology of Arbitrary Shape Sidelobe Beamforming

XING Gaoxiang, CAI Zhiming

(Dept. of Electronics Engineering, Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: An adaptive weighting algorithm is proposed based on the adaptive null beamforming technology, which can be used for forming arbitrary sidelobe shape beam pattern for arbitrary structure arrays, considering the effect of element directivity at the same time. Three steps are given to implement the new algorithm; by presetting the sidelobe shape and sidelobe level and having cycle steps, the real beam pattern will close to the presetting one. The new algorithm is applied to arrays such as uniform linear array and parabola array as examples and compared with Dolph-Chebyshev (DC) weighting algorithm, and all the examples have the desired results. It is shown that the element directivity has little effect on the beamforming by the new algorithm and that the new algorithm can eliminate the effect of the broadband element directivity in broadband beamforming.

Key words: beamforming; arbitrary shape sidelobe; adaptive weighting; element directivity

1 引言

波束形成是通信、雷达和声纳信号处理中的一个重要组成部分. 波束形成系统可以看作是一种空间滤波器, 使得基阵(或天线)只在某一方向具有较高的灵敏度, 而抑制来自别的方向的噪声和干扰. 对噪声和干扰的抑制能力的一个直观表征就是波束的旁瓣级, 低旁瓣级可以有效地抑制来自旁瓣区域的噪声和干扰^[1, 2]. 所以, 低旁瓣波束形成一直是阵列信号处理的研究热点之一.

对于抑制噪声和干扰, 研究较多的是自适应阵列, 在干扰方向形成波束零点^[3-6], 但这不能整体的压低旁瓣, 达到整体提高信干噪比的目的. 在自适应阵列波束零陷形成技术的基础上, 假设在旁瓣区域存在若干干扰源, 强度可控, 当干扰源数目大于基阵传感器数目时, 能整体降低旁瓣^[2]. 但是这种方法对宽带波束进行优化时没有考虑基元的方向性, 而基元方向性在宽带情况下是随频率变化的.

本文在文献[2]的基础上, 形成旁瓣形状可以任意控制的波束, 以适应不同应用场合的需求; 同时引进基元的方向性,

考虑方向性对波束形成的影响. 该方法不仅可以用于均匀线阵, 还可以用于任意阵型阵列. 本文的工作可以作为宽带恒定束宽波束形成^[2]中当基元宽带方向性随频率变化时进行宽带波束优化的基础.

2 任意形状旁瓣波束形成

设有一 N 元线阵, 用 d_j 表示以波长为单位的第 j 个基元与第 $j+1$ 个基元的间距. 设远场单频平面波信号以角度 H 入射在基阵上, 则基阵的输出信号为

$$s(t) = \sum_{j=1}^N w_j x_j(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 是权矢量, T 代表转置, 设信号幅度为 A , 平面波信号频率为 X_0 , 则观察向量 $\mathbf{x} = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T = A \mathbf{e}^{jX_0 \mathbf{u} t}$, \mathbf{u} 是指向向量, 其表达式为

$$\mathbf{u} = [f_1(H), f_2(H) e^{-j\zeta_2(H)}, \dots, f_N(H) e^{-j\zeta_N(H)}]^T \quad (2)$$

其中 $\zeta_j(H) = 2\pi \left[\sum_{k=1}^{j-1} d_k \right] \sin H$ ($j \geq 2$), $f_j(H)$ 表示基元的方向性. 定义波束为^[7-9]

$$p(H) = |w^T u| \tag{3}$$

定义主波束左边第一个零点和右边第一个零点分别为 H_L 和 H_R . 定义区域 $[H_L, H_R]$ 为主瓣区域, $[H_L, H_R]$ 之外的区域为旁瓣区域.

问题是如何在保持波束主瓣形状大致不变的情况下, 控制旁瓣的形状及幅度(旁瓣级).

2.1.1 波束任意形状旁瓣控制算法

观察式(3)可知, 要控制波束形状, 仅需改变权矢量.

在实际环境中, 观察向量 x 由三部分组成:

$$x = x_d + x_i + x_n = x_d + x_u$$

其中, x_d 、 x_i 、 x_n 分别表示信号向量、干扰向量与噪声向量, $x_u = x_i + x_n$ 为不期望的部分. 这三部分互相独立, 且噪声是均值为零、方差为 R^2 的窄带随机过程, 基元间独立.

自适应阵能根据干扰强度和方位自动调整权矢量, 则最佳权矢量可以通过下式获得

$$w = L S_u^{-1} u_d^* = L (R^2 I + A_i^2 u_i^* u_i^T)^{-1} u_d^* \tag{4}$$

式中, L 为任意非零标量, A_i 为干扰的幅度, 设期望信号的方位角为 H_d , 则 u_d 可由式(2)令 $H = H_d$ 获得, 干扰的方位角为 H_i , u_i 由式(2)令 $H = H_i$ 获得, I 为单位矩阵, $*$ 代表复共轭.

图1所示为单个干扰源从-30度的方位入射在10元均匀线阵上, 基元各向同性, 基元间距为期望信号的半波长, 期望信号位于0度方位时所形成的波束. 定义每一个各向同性($f_i(H) = 1$)基元的干扰噪声比为

$$INR = N = A_i^2 / R^2$$

变化干扰源的强度, 即取 $INR = -10\text{dB}, 0\text{dB}, 10\text{dB}$. 从图1分析可见, 干扰越强, 形成的零陷越深.

N 元自适应阵对干扰的响应不仅与干扰的强度有关, 还与干扰源的数目有关^[5], 当干扰源的数目小于 $N - 2$ 时, 可以在波束图上形成零陷; 当干扰源的数目大于 $N - 2$ 时, 不能形成零陷, 但会整体降低波束的旁瓣级.

应用这一思想, 可以在旁瓣区域分布很多个假定的干扰源, 如 M 个(基元数目的3-10倍). 采用迭代的方式自动调整干扰源强度. 当旁瓣高于预设的数值时, 增大干扰强度; 若旁瓣低于预设值时, 适当减小干扰强度, 可以达到任意控制波束旁瓣形状、旁瓣级大小的目的. 这种控制旁瓣的过程, 其实就是由假定的干扰源调整阵元的权系数的过程. 类似于控制过程中的反馈部分, 旁瓣控制过程是由程序(软件)完成的. 所以, 加入假定的干扰源后, 这些干扰源对阵元输入端的信噪比不产生任何影响.

自适应旁瓣控制过程具体分以下几个步骤进行:

第一步, 初始化过程, $k = 0$, k 为迭代次数. 在整个观察角内均匀分布 M 个假定的干扰源, 方位分别为 $H_m, m = 1, \dots, M$, 强度设为零. 采用式(2)~(4)形成无干扰时的初始化波束, 波束峰值归一化到1.

第二步, 确定初始化波束的主瓣区域 $[H_L(k), H_R(k)]$. 设定期望的波束旁瓣级 $D(H_m)$, 整个 $D(H_m)$ 即为旁瓣形状.

第三步, 开始迭代过程. 自动调整干扰源的强度. 第 $k + 1$ 次迭代时的干扰源强度为

$$N_m(k+1) = \begin{cases} 0, H_m \in [H_L(k), H_R(k)] \\ \max[0, \#_i(k)], \text{其它} \end{cases} \tag{5}$$

其中, $\#_i(k) = N_m(k) + K[p(H_m, k) - d(H_m)]$ K 为一常量因子, 称为迭代增益; $d(H_m)$ 表达式如下

$$d(H_m) = 1 / (10^{[D(H_m)/20]}) \tag{7}$$

在指定了 $N_m(k)$ 后, 式(4)中的 S_u 如下

$$S_u = R^2 \left[I + \sum_{m=1}^M N_m(k) u_m^* u_m^T \right] \tag{8}$$

以式(4)计算得到的权矢量代入到式(3), 得到 $p(H, k)$. 重新确定新得到的波束的主瓣区域 $[H_L(k), H_R(k)]$. 如此循环迭代, 直到 $p(H, k)$ 的旁瓣与期望得到的旁瓣 $D(H_m)$ 基本吻合时, 即可退出循环.

通过以上三步, 就能获得期望的旁瓣形状与旁瓣级, 只要任意设置 $D(H_m)$, 就能够得到任意形状旁瓣.

需说明的是, 式(6)中的迭代增益 K , 不能取得太大, 否则迭代过程稳定性差; 如果 K 取得太小, 迭代过程收敛很慢. 它的最佳值可以通过尝试的办法得到.

2.1.2 任意形状旁瓣仿真实现

为具体起见, 以两个实例来检验以上算法的有效性.

考虑30元均匀线阵, 基元各向同性($f_i(H) = 1$), 基元间距为期望信号的半波长, 期望信号位于0度方位. 在线阵的扫描扇面 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 内, 均匀分布200个假设的干扰源, 强度按照上述算法进行设置. 采用上述算法的三个步骤, 分别设置阶跃式旁瓣和楔形旁瓣包络, 得到图2所示波束图. 其中图2(a)为阶跃式旁瓣包络, 即在 $[-90^\circ, -40^\circ]$ 和 $[40^\circ, 90^\circ]$ 两个区间内旁瓣级为 -40dB , 在区间 $(-40^\circ, 40^\circ)$ 内, 旁瓣级为 -30dB ; 图2(b)为楔形旁瓣包络, 在区间 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 内, 从 -50dB 开始以 $0.2\text{dB}/\text{度}$ 的速度上升, 到达 0° 后, 又以 $0.2\text{dB}/\text{度}$ 的速度下降, 形成一个楔形包络.

图2所示的算例表明, 迭代算法是有效的, 所得旁瓣与预

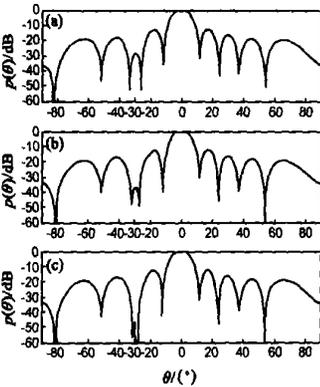


图1 存在单个干扰源 ($\theta = -30^\circ$) 时自适应波束 (a) $INR = -10\text{dB}$, (b) $INR = 0\text{dB}$, (c) $INR = 10\text{dB}$

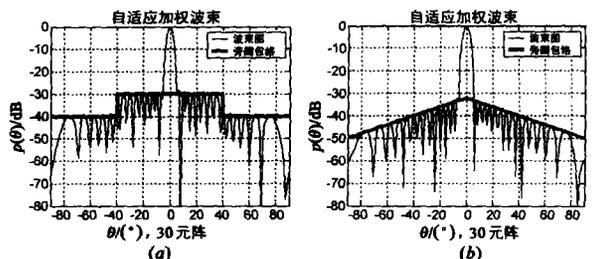


图2 30元阵指定旁瓣波束图 (a) 阶跃式旁瓣波束图 (b) 楔形旁瓣波束图

设旁瓣形状吻合. 如果任意设定波束的旁瓣级 $D(H_m)$, 就可以得到具有任意形状旁瓣的波束图.

3 应用

将上述算法应用于几个具体阵型, 并与其它算法进行比较, 分析新算法的性能.

3.1.1 应用于均匀线阵

前面在任意形状旁瓣波束的仿真中, 采用的是均匀线阵, 现仍旧用均匀线阵, 但形成等高旁瓣. 关于这一问题, 常采用的是道夫2切比雪夫(DC)加权. 现将 DC 加权与新方法进行对比, 并考虑基元存在方向性对两种方法在波束形成时的影响.

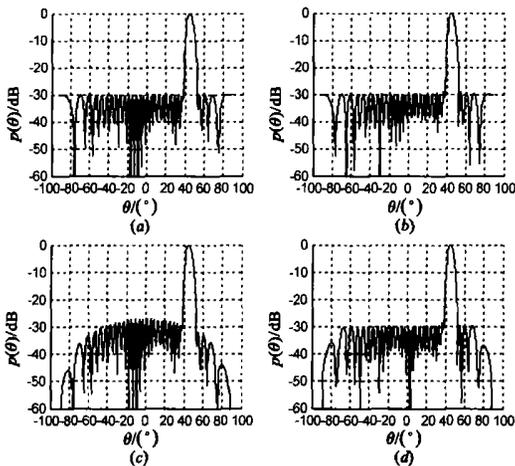


图 3 道夫-切比雪夫(DC)加权与新算法加权波束图的比较 (a) DC 加权(无方向性); (b) 自适应加权(无方向性); (c) DC 加权(有方向性); (d) 自适应加权(有方向性)

30 元均匀线阵, 基元各向同性($f_j(H) = 1$), 基元间距为期望信号的半波长, 期望信号位于 45° 方位. 首先采用 DC 加权, 得到 -30dB 的等高旁瓣, 如图 3(a) 所示; 再用本文方法同样得到 -30dB 的等高旁瓣, 如图 3(b) 所示. 这两子图表明, 在各向同性基元组成的均匀线阵波束形成问题上, 本文的自适应加权和 DC 加权基本是相同的.

但是, 如果基元存在方向性, 上述情况会有所改变. 采用与上述阵型相同的均匀线阵, 基元的方向性函数为 $f_j(H) = \cos H$. 同样以 DC 加权和本文的自适应加权方法形成 -30dB 的等高旁瓣, 得到图 3(c)、(d) 所示结果. 图 3(c) 表明, 此时 DC 加权得到的不再是等高旁瓣, 整个旁瓣包络呈弧线型. 但是, 本文的自适应加权方法得到的还是等高旁瓣, 如图 3(d) 所示. 基元的方向性对 DC 加权有影响, 而对自适应加权基本没影响.

以上分析可知, 本文的自适应加权方法与 DC 加权相比, 更具有通用性: DC 加权方法仅仅适用于由各向同性基元组成的均匀线阵波束形成问题; 新算法不仅适用于上述问题, 而且在基元具有方向性时仍旧适用.

3.1.2 应用于任意阵型阵列

当阵型不是均匀线阵时, 采用 DC 加权降低旁瓣的方法已不再适用, 需要一种新方法降低旁瓣或形成等高旁瓣.

为不失一般性, 考虑一抛物线阵, 阵型如图 4 所示. 抛物线方程为 $x^2 = -2p(y - 2)$, $p = 0.5$. 阵元在抛物线上以等极角分布, 极角变化步幅为 5° , 该抛物线阵共分布 37 个基元.

首先采用各向同性基元, 进行常规波束形成, 让主波束指向 45° 方位, 如图 5(a) 所示, 由于没做任何波束优化, 旁瓣很高. 运用本文提出的自适应加权算法, 得到图 5(b) 所示波束图, 旁瓣级控制在 -30dB , 而且形成的是等高旁瓣.

然后采用带方向性的基元, 方向性函数为心形线函数^[1], $f_j(H) = \exp[-(H/90)^2]$, H 以度为单位.

心形线主极大方向指向基元所在处的抛物线法线方向. 主波束同样指向 45° , 常规波束图如图 5(c) 所示, 由于

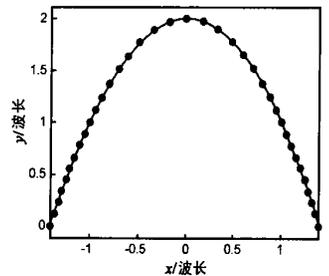


图 4 抛物线阵阵型示意图

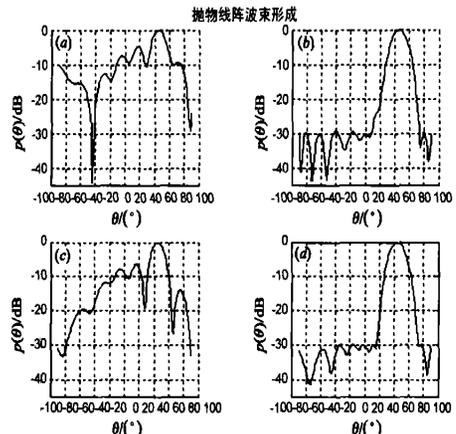


图 5 抛物线阵波束图 (a) 原始波束(无方向性) (b) 自适应加权波束(无方向性) (c) 原始波束(有方向性) (d) 自适应加权波束(有方向性)

基元带有方向性, 使波束主瓣更为明显, 旁瓣相对于图 5(a) 有一定的降低. 采用心形线作方向性函数, 能保证波束主瓣有所改善的情况下, 在一定程度上压低旁瓣, 即方向性函数对波束的影响主要体现在波束图的旁瓣区域. 自适应加权算法的波束图如图 5(d) 所示, 旁瓣级也控制在 -30dB 左右.

比较图 5(b)、图 5(d) 两图, 波束的差别不大, 图 5(d) 主瓣略有改善. 这也再一次说明基元的方向性对自适应加权算法所得波束图的影响不大, 原因是由于自适应加权算法中的参考旁瓣级(预设的旁瓣级)是相同的, 所以无论基元具有方向性与否, 在算法收敛时, 波束图的旁瓣都将趋于相同的旁瓣级, 图 3、图 5 都说明了这一问题. 基于该算法的这个特性, 在基元方向性随频率变化的宽带信号处理问题中, 如宽带恒定束宽波束形成^[2], 应用本文的自适应加权算法, 可以消除基元方向性对波束的影响.

仔细比较图 5 中的原始波束与自适应加权波束, 会发现后者的波束宽度比前者大, 以图 5(c) 和图 5(d) 为例, 组合于图 6(a), 其中实线部分为原始波束的曲线, 而虚线部分为自

适应加权波束的曲线。此时, 如果将算法加以改进, 把算法第三步(循环过程)中的主瓣宽度计算忽略, 沿用初始波束的主瓣宽度, 重新运行图 6 (a) 的程序, 得到图 6 (b), 即自适应加权波束的波束主瓣宽度与原始波束的基本吻合。算法改进后可以保证在压低旁瓣时波束主瓣宽度不变。

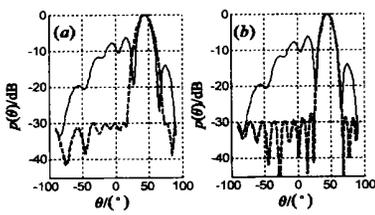


图 6 算法改进后抛物线阵波束图
实线: 原始波束; 虚线: 自适应加权波束

4 结论

在自适应零陷形成的基础上, 提出了一种自适应加权算法, 用以构成波束图的具有任意形状的旁瓣。该算法不仅可用于均匀线阵, 得到与 DC 加权相同的等高旁瓣, 而且还可以用于任意阵型的阵列, 形成等高旁瓣或任意形状的旁瓣。算法改进后可以保证在压低旁瓣的同时波束主瓣宽度不变。另外, 相应的研究还表明, 基元的方向性对自适应加权的新算法波束形成影响不大, 可以消除宽带处理中基元方向性随频率变化对波束的影响。

本文的自适应加权算法作为一种波束形成算法, 可以应用于任意阵型阵列形成具有任意形状旁瓣的波束图。

参考文献:

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2003. 179- 208.
- [2] 杨益新, 孙超, 等. 宽带低旁瓣时域波束形成[J]. 声学学报, 2003, 28(4): 331- 338.
YANG Yixin, SUN Chao, et al. Broadband low sidelobe beamforming in time domain[J]. Acta Acoustica, 2003, 28(4): 331- 338. (in Chinese)
- [3] Hamid Krim, Mats Viberg. Two decades of array signal processing research[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67- 94.

- [4] Paulraj A J, Gesbert D, Papadias C. Smart antennas for mobile communications[A]. Encyclopedia for Electrical Engineering, John Wiley, 2000. 1- 15.
- [5] Compton Jr R T. Adaptive array concepts and performance[M]. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall, 1988. 75- 153.
- [6] Wu L, Zielinski A. An iterative method for array pattern synthesis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 280- 286.
- [7] Zhou P Y, Ingram M A, Anderson P D. Synthesis of minimax sidelobe for arbitrary arrays[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1998, 46(11): 1759- 1760.
- [8] 沈建峰, 王宗欣. 智能天线中新的波束形成方法[J]. 电子学报, 2004, 14(5): 678- 680.
SHEN Jianfeng, WANG Zongxin. New beamforming methods in smart antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 14(5): 678- 680. (in Chinese)
- [9] 李洪升, 赵俊渭, 等. 一种新的盲波束形成器建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 32(3): 373- 376.
LI Hongsheng, ZHAO Junwei, et al. A new blind beamforming modeling and simulation[J]. Journal of System Simulation, 2002, 32(3): 373- 376. (in Chinese)

作者简介:



幸高翔 男, 1978 年 4 月出生于江西省高安市, 2003 年毕业于海军工程大学, 硕士, 现为海军工程大学讲师, 研究方向为水声信号处理、阵列信号处理。E-mail: nuexinggx@yahoo.com.cn.



蔡志明 男, 1962 年 11 月出生于福建省福州市, 2002 年毕业于哈尔滨工程大学, 博士, 现为海军工程大学教授、博导; 总装水声及水声技术专家组成员, 中国声学学会理事, 研究方向为信号处理、水声物理及声纳技术。
E-mail: zncai@jlonline.com.